

Das Supernova Cosmology Project

Christoph Wendel

30.01.2010

Das Supernova Cosmology Project (kurz SCP) ist ein internationales Forschungsprogramm aus der Astrophysik, das in den 90er Jahren durchgeführt wurde. Ca. 30 Wissenschaftler verschiedener Institute suchten nach weit entfernten Supernovae vom Typ Ia (kurz SNe Ia). Diese im wesentlichen durch C- und O-Fusion getriebenen Sternexplosionen ereignen sich, nachdem ein Weißer Zwerg seine Masse durch Akkretion auf die Chandrasekhar-Grenzmasse erhöht hat. Sie haben aufgrund dieses immer gleich ablaufenden Prozesses eine einheitliche absolute Helligkeit von $M_{max} \approx -19.3 \text{ mag}$. Die SCP-Forscher bestimmten die Entfernung d sowie die Rotverschiebung z der SNe Ia mit $z > 0.1$, wodurch man auf die vergangene Entwicklung der Expansion des Universums schließen kann. Als Ergebnis des SCP wurden bei gegebener Rotverschiebung z Entfernungen d gemessen, die größer als erwartet waren. Dies legt eine durch Dunkle Energie angetriebene beschleunigte Expansion nahe. Die Dichte der Materie bzw. der Dunklen Energie wurden für $\rho_M + \rho_\Lambda = \rho_c$ zu $\rho_M = 0.28\rho_c$ und $\rho_\Lambda = 0.72\rho_c$ bestimmt. Zunächst werden kurz astrophysikalische Grundlagen vermittelt, die zum Verständnis des Ergebnisses des SCP und dessen Deutung nötig sind. Im Hauptteil wird das SCP an sich erläutert.

1 Grundlagen

1.1 Der Entfernungsmodul

Zur Entfernungsmessung eines leuchtenden Objekts wichtige astrophysikalische Größen sind die scheinbare Helligkeit m , gemessen in der Pseudoeinheit mag, sowie der Strahlungsstrom S , gemessen in W m^{-2} , die über folgende Gleichung in Beziehung gesetzt sind:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \lg \left[\frac{S_1}{S_2} \right] \text{ mag} \quad (1)$$

Hierbei beziehen sich die Indices 1 und 2 auf zwei verschiedene Objekte; die Beziehung ist somit nur relativ. Es ist also noch kein Nullpunkt für die Skala von m gesetzt. (Dieser Nullpunkt wird über den Stern Wega mit $m = 0.03 \text{ mag}$ und $L = 37 L_\odot$ definiert.) Der Vorfaktor -2.5 ist nötig, damit der physikalisch messbare Strahlungsstrom mit der Größenklassenskala, die von Hipparch willkürlich festgesetzt wurde, überein stimmt. Das Auftreten des Zehnerlogarithmus rührt von der logarithmischen Wahrnehmung der Helligkeit des menschlichen Auges her: Wird ein visueller Reiz verzehnfacht, so erscheint er dem Auge um 2.5 mag heller.

Jedem Objekt mit der Leuchtkraft L wird außerdem eine absolute Helligkeit M zugeordnet. M ist definiert als die scheinbare Helligkeit m dieses Objekts in einer Entfernung von $d = 10 \text{ pc}$. Mit Gleichung (1) folgt

$$\begin{aligned} m - M &= -2.5 \cdot \lg \left[\frac{S}{S_{10 \text{ pc}}} \right] \text{ mag} = \\ &= -2.5 \cdot \lg \left[\frac{L}{4\pi d^2} \cdot \frac{4\pi (10 \text{ pc})^2}{L} \right] \text{ mag} = \\ &= -2.5 \cdot \lg \left[\frac{(10 \text{ pc})^2}{d^2} \right] \text{ mag} = \end{aligned}$$

$$= 5 \cdot \lg \left[\frac{d}{10 \text{ pc}} \right] \text{ mag} \quad (2)$$

Den Term $m - M$ nennt man den Entfernungsmodul. Löst man nach d auf, so ergibt sich:

$$d = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{m-M}{5 \text{ mag}}} \quad (3)$$

Aus Kenntnis der scheinbaren und der absoluten Helligkeit kann also die Entfernung eines Objekts bestimmt werden. Eine Vergrößerung von m um 5 mag bedeutet beispielsweise eine Vergrößerung von d um den Faktor 10.

Als Beispiel soll die Entfernung d_{SN} der Supernova 1994D berechnet werden, die im März 1994 in der Galaxie NGC 4526 im Virgo-Galaxienhaufen aufleuchtete. Ihre maximale scheinbare Helligkeit betrug $m = 11.8 \text{ mag}$. Mit dem bekannten Wert von $M = -19.3 \text{ mag}$ für die absolute Helligkeit erhält man unter Verwendung von Gleichung (3):

$$d_{SN} = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{11.8 \text{ mag} - (-19.3 \text{ mag})}{5 \text{ mag}}} = 16.6 \text{ Mpc}$$

Der Literaturwert für die Entfernung von NGC 4526 ist 16.9 Mpc .

Anmerkung: Bei sehr großen Entfernungen muss der oben formulierte Entfernungsmodul mit den Methoden der relativistischen Kosmologie verallgemeinert werden. Zusätzlich gehen dann in die Formel die kosmologischen Parameter ein, die das jeweilige Friedmann-Weltmodell festlegen.

1.2 Supernovae Ia

Supernovae vom Typ Ia (auch thermonukleare Supernovae) sind spektroskopisch durch Abwesenheit von H-Linien und Vorhandensein von Si-Linien definiert.

Der Progenitor einer SN Ia ist ein in einem Doppelsternsystem gebundener Weißer Zwerg, welcher üblicherweise aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht und dessen Masse knapp unterhalb der Chandrasekhar-Grenzmasse liegt. In einem Doppelsternsystem kann der Weiße Zwerg Masse vom Partnerstern (z. B. einem Roten Riesen, dessen Masse an der Oberfläche nur schwach gebunden ist) absaugen. Durch diesen Akkretionsfluss steigt die Masse des Weißen Zwergs an, wodurch der Radius abnimmt (im nicht relativistischen Fall gilt $R \sim M^{-1/3}$). Dies resultiert in einem Anwachsen der Dichte ρ und der Temperatur T des Weißen Zwergs. Überschreitet die Temperatur einen Grenzwert von $T \approx 10^9$ K und die Dichte einen Grenzwert von $\rho \approx 2 \times 10^8 \text{ kg m}^{-3}$, so setzt zunächst Kohlenstoff-Fusion und Sauerstoff-Fusion ein und schließlich entsteht über eine Reihe weiterer Reaktionen ^{56}Ni . Durch die Energiefreisetzung während der Fusion erhöht sich die Temperatur weiter. Die Fusionsreaktionsrate aufgrund der Temperaturerhöhung explosionsartig an. Die insgesamt freiwerdende Energie beträgt $E \approx 10^{44}$ J, wovon jedoch der größte Teil in Form von Neutrinos abgestrahlt wird, die die Hülle des Weißen Zwergs bis auf eine Geschwindigkeit $v \approx 10^4 \text{ km s}^{-1}$ beschleunigt.

Die Lichtkurve einer SN Ia ist aufgrund der stets gleichen Abläufe bei der Explosion und aufgrund der stets gleichen Anfangsbedingungen ($M \lesssim M_{\text{Chan}}$, Zusammensetzung: C und O) nahezu gleichförmig. Wegen schneller Vergrößerung der Oberfläche des Weißen Zwergs steigt die Leuchtkraft zunächst innerhalb einiger Wochen stark an. Im Maximum beträgt die Leuchtkraft stets $L_{\text{max}} \approx 5 \cdot 10^9 L_{\odot}$, was einer absoluten Helligkeit von $M_{\text{max}} \approx -19.3 \text{ mag}$ entspricht. Nach Durchlaufen dieses Maximums fällt die Leuchtkraft aufgrund des radioaktiven β^+ -Zerfalls ($^1_0\text{p} \rightarrow ^1_0\text{n} + \text{e}^+ + \nu_{\text{e}}$) von ^{56}Ni über ^{56}Co zu ^{56}Fe exponentiell ab; für die Halbwertszeit gilt $40 \text{ d} < T_{1/2} < 70 \text{ d}$. Dieser exponentielle Abfall der Leuchtkraft entspricht gemäß Gleichung (1) einem linearen Abfall der Helligkeit.

Zu jedem Zeitpunkt hat die SN Ia ein charakteristisches Spektrum. Somit kann durch Analyse des Spektrums auf den Zeitpunkt, zu dem sich die Lichtkurve gerade befindet, rückgeschlossen werden.

Tatsächlich kann die absolute Helligkeit einer SN Ia von der durchschnittlichen absoluten Helligkeit ($M_{\text{max}} \approx -19.3 \text{ mag}$) um den Faktor s abweichen. Ist dies der Fall, so unterscheidet sich jedoch immer auch die Dauer von der durchschnittlichen Dauer um genau diesen Faktor s . Durch Beobachtung der Dauer einer bestimmten SN und Vergleich mit der durchschnittlichen Dauer kann also s bestimmt werden und somit auch die tatsächliche absolute Helligkeit dieser SN. Der Zusammenhang zwischen tatsächlicher absoluter Helligkeit und Dauer wird durch die Phillips-Relation beschrieben.

Im SCP wurden SNe Ia als Standardkerzen verwendet. SNe Ia eignen sich aufgrund folgender Gründe gut als Standardkerzen:

- Wie zuvor erklärt haben sie eine nahezu konstante absolute Helligkeit. Somit kann durch Messung der scheinbaren Helligkeit über Gleichung (3) die Entfernung berechnet werden.

- Ihre sehr große absolute Helligkeit lässt die Messung sehr großer Entfernungen zu.
- Der Mechanismus der SNe Ia ist recht gut verstanden.
- Es gibt (nach derzeitigem Kenntnisstand) keine Evolution der SNe Ia. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass auch vor vielen Milliarden Jahren die durchschnittliche absolute Helligkeit $M_{\text{max}} \approx -19.3 \text{ mag}$ hatte.
- Da SNe Ia in jedem Teil des Universums auftreten, können sie im lokalen Universum geeicht werden.

Als Nachteile der SNe Ia zählen:

- SNe Ia ereignen sich selten (Rate: einige Ereignisse pro 1000 a pro Galaxie).
- SNe Ia sind ein zufälliges Ereignis, können also nicht vorhergesagt werden.
- SNe Ia sind ein kurzes Ereignis. Die Beobachtung muss also zügig geschehen.

Anmerkung: Durch neuere Untersuchungen (Supernova Legacy Survey, 2006) wird die stets gleiche durchschnittliche absolute Helligkeit ($M_{\text{max}} \approx -19.3 \text{ mag}$) von SNe Ia angezweifelt. Geht man von einem rotierenden Weißen Zwerg oder von zwei in einem Doppelsternsystem gebundenen Weißen Zwergen als Progenitor aus, so kann aufgrund der erhöhten enthaltenen Masse eine erhöhte absolute Helligkeit erklärt werden.

2 Das Supernova Cosmology Project

2.1 Geschichtlicher Abriss

Anfang des 20. Jh. war eher aus philosophischen als aus empirischen Gründen allgemein akzeptiert, dass unser Universum statisch, also zeitlich unveränderlich ist. Einstein's Gleichungen der ART sagten jedoch ein sich entwickelndes Universum voraus. Um dies zu verhindern und die alte Tradition zu bewahren fügte Einstein 1917 einen weiteren Term in die ART ein, der eine Abstoßung auf großen Skalen beschreibt und als kosmologische Konstante Λ bekannt wurde. 1929 entdeckte Hubble jedoch, dass das Universum expandiert, also nicht statisch ist. Die Expansion lässt sich durch das Hubble-Gesetz $c \cdot z = H_0 \cdot d$ beschreiben. Die Rotverschiebung z ist also direkt proportional zur Entfernung d . Kurzerhand löschte Einstein die kosmologische Konstante als „größte Eselei“ wieder, da sie nicht mehr nötig war.

Bis in die 90er Jahre gingen Astrophysiker davon aus, dass die Expansionsgeschwindigkeit abnehmen müsse, da die gravitative Anziehung der gesamten im Universum enthaltenen Masse der Ausdehnung entgegenwirkt. Unter der Annahme das Universum sei ausschließlich mit Masse der Dichte ρ_M gefüllt, ergaben sich drei mögliche Fälle:

- $\rho_M < \rho_c$: Die Masse reicht nicht aus, um die Expansion jemals zu stoppen. Die Expansion ist zwar abgebremst, dauert aber für immer an. Dieses Universum ist offen und hat eine hyperbolische Geometrie.

- $\rho_M = \rho_c$: Die Masse reicht gerade aus, um die Expansion nach unendlich langer Zeit zu stoppen. Die Expansion ist abgebremst und geht asymptotisch gegen Null. In diesem Grenzfall hat das Universum eine flache euklidische Geometrie.
- $\rho_M > \rho_c$: Das Universum enthält genügend Masse, um die Expansion in endlicher Zeit zu stoppen. Die Expansion ist abgebremst und geht zu einer bestimmten Zeit in eine Kontraktion über. Letztendlich kollabiert das Universum in einer Singularität. Der sogenannte Big Crunch ereignet sich. Dieses Universum ist geschlossen und besitzt eine spärliche Geometrie.

Hierbei ist $\rho_c = (3H^2)/(8\pi G) \approx 1.8 \times 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ die kritische Dichte, deren Wert aus der Friedmann-Gleichung, also aus der ART folgt.

In den 90er Jahren schlossen sich Astrophysiker zum SCP zusammen, um heraus zu finden, welcher dieser drei Fälle zutrifft. Man wollte also das Hubble-Diagramm auf große Entfernungen und Rotverschiebungen ausdehnen. Dazu müsse man die Expansionsgeschwindigkeit in großen Entfernungen messen. Da die Beobachtung großer Entfernungen einem Blick in die Vergangenheit entspricht, würde man also die Expansionsgeschwindigkeit in großer Vergangenheit messen.

Hintergrund:

Die Entwicklung des Universums kann allgemein durch die Friedmann-Gleichung beschrieben werden, die aus der ART folgt. Eine mögliche Darstellung der Friedmann-Gleichung lautet:

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8}{3}\pi G\rho_M - \frac{\Lambda c^2}{3} = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (4)$$

Hierbei ist ρ_M die Dichte der im Universum enthaltenen Masse, G ist die Newtonsche Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit. Der Krümmungsindex k ist ein Maß für die Krümmung des Universums und R stellt den sogenannten Skalenfaktor dar, also die Größe des Universums zu einer bestimmten Zeit in Bezug auf die heutige Größe. $R = 0.25$ bedeutet zum Beispiel, dass die Größe des Universums nur 1/4 der heutigen Größe betrug. Der abstoßend wirkenden kosmologischen Konstante Λ kann nun eine Energiedichte $\rho_\Lambda = (\Lambda c^2)/(8\pi G)$ zugeschrieben werden. Damit lautet Gleichung (4):

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8}{3}\pi G(\rho_M + \rho_\Lambda) = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (5)$$

Mit der Definition der Hubble-Konstante $H = \dot{R}/R$ folgt:

$$H^2 - \frac{8}{3}\pi G(\rho_M + \rho_\Lambda) = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (6)$$

Es ist nun sinnvoll den Wert, den die Gesamtdichte $\rho_M + \rho_\Lambda$ für $k = 0$ annimmt als kritische Dichte ρ_c zu bezeichnen. Dann ist $\rho_c = (3H^2)/(8\pi G)$. Je nach dem Wert der Gesamtdichte sind drei Fälle möglich:

- $\rho_M + \rho_\Lambda < \rho_c \Leftrightarrow k = -1$ offenes Universum
- $\rho_M + \rho_\Lambda = \rho_c \Leftrightarrow k = 0$ flaches Universum
- $\rho_M + \rho_\Lambda > \rho_c \Leftrightarrow k = +1$ geschlossenes Univ.

2.2 Suche nach SNe Ia

Man musste also die Rotverschiebung z und die Entfernung d von Objekten messen. Die Rotverschiebung lässt sich spektroskopisch problemlos bestimmen. Die Entfernungsmessung sollte SNe Ia als helle Standardkerzen verwenden. Wie oben dargelegt kann man aus bekanntem M und gemessenem m auf d schließen.

Die Suche nach SNe Ia lief folgendermaßen ab: Jeweils an Neumond wurden mit dem CTIO in Chile bis zu 100 Wide-Field-Aufnahmen zufällig ausgewählter Himmelsgebiete gemacht, von denen jede ca. 1000 Galaxien zeigt. Nach drei Wochen, also ca. eine Woche vor dem nächsten Neumond, wurden die selben Himmelsgebiete erneut belichtet. Die beiden Aufnahmen ein und desselben Himmelsgebiets wurden sodann verglichen. Zeigte sich auf der späteren Aufnahme eine neue Lichtquelle, also ein Kandidat für eine SN, so richtete man stärkere Teleskope (Keck Telescope, Hawaii oder HST) am nun bevorstehenden Neumond auf diese Kandidaten. Durch Analyse des Spektrums konnte man SNe Ia von übrigen SNe trennen. An diesen SNe Ia führte man nun (zu der Zeit des Neumonds, zu der bestmögliche Beobachtungsbedingungen herrschen) intensive Vermessungen durch. Durch den Abstand von vier Wochen zwischen erster Belichtung und intensiver Beobachtung kann an sicher sein, dass die gefundenen SNe höchstens vier Wochen alt sind und die Helligkeit noch vor ihrem Maximum steht.

Diese Technik wurde 1992 von einer Forschungsgruppe um S. Perlmutter vom LBNL erstmals angewandt. Im Laufe der Jahre schlossen sich weitere Astrophysiker an und dieses Projekt wurde als SCP bekannt. Forschungen, die das gleiche Ziel wie das SCP verfolgten, wurden unabhängig vom High-Z Supernova Search Team durchgeführt.

2.3 Ergebnis des SCP

Im Jahr 1998 wurde von beiden Teams ein übereinstimmendes Ergebnis, das erweiterte Hubble-Diagramm, publiziert, welches in Abb. 1 zu sehen ist. In der linken oberen Graphik

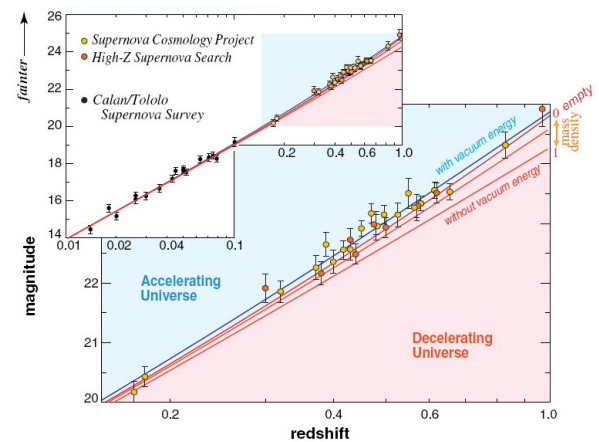


Abb. 1: Erweitertes Hubble-Diagramm

sieht man das vollständige Hubble-Diagramm. Für $z < 0.1$ sind ältere Ergebnisse zu sehen, für $z > 0.1$ sind die des SCP dargestellt. Dieser Teil $z > 0.1$ ist in der rechten unteren Graphik vergrößert. Die blaue Linie stellt die Messung des SCP

dar. Sie weicht umso mehr vom rot hinterlegten Bereich ab, je größer z ist. Dieser rot hinterlegte Bereich stellt jedoch die Erwartungen eines abgebremst expandierenden Universums dar. Die roten Linien entsprechen Modellrechnungen ohne kosmologische Konstante, bei denen von oben nach unten die Massendichte ρ_M zunimmt.

Offensichtlich war die bisherige Vorstellung der kosmischen Expansion falsch. Bei gegebenem z waren die SNe also schwächer als erwartet. Was bedeutet jedoch nun die Verschiebung des Graphen im Hubble-Diagramm nach oben?

Um dies zu verstehen betrachtet man die Hubble-Beziehung

$$c \cdot z = H_{(z)} \cdot d \quad \Leftrightarrow \quad d = \frac{c \cdot z}{H_{(z)}}$$

Da man ja eine nicht-gleichförmige Expansionsgeschwindigkeit betrachtet, wird hier eine von der Rotverschiebung abhängige Hubble-Konstante $H_{(z)}$ anstelle von dem nur für $z < 0.1$ bzw. $d < 420$ Mpc geltenden H_0 verwendet. Durch Logarithmieren folgt

$$\lg d = \lg c + \lg z - \lg H_{(z)} \quad (7)$$

Aus dem Entfernungsmodul Gleichung (2) folgt außerdem, dass

$$m \sim \lg d \quad (8)$$

Zusammen (Gleichung (7) und (8)) gilt also

$$m \sim \lg c + \lg z - \lg H_{(z)} \quad (9)$$

Diese Beziehung ist in Abb. 1 dargestellt. Auf der x-Achse ist $\lg z$, auf der y-Achse ist m dargestellt. Der Logarithmus $\lg c$ der Lichtgeschwindigkeit ist eine Konstante, die lediglich eine gleichbleibende Verschiebung des Graphen nach oben bewirkt und hier irrelevant ist. Die Addition von $-\lg H_{(z)}$ bewirkt ebenfalls eine Verschiebung des Graphen in y-Richtung in Bezug auf den Graphen mit H_0 , die jedoch von z abhängt. Es gibt zwei Fälle:

Fall 1: Ist $H_{(z)} < H_0$, so ist auch $\lg H_{(z)} < \lg H_0$. Der Graph sitzt also oberhalb des H_0 -Graphs (blauer Bereich in Abb. 1).

Analog gilt:

Fall 2: Ist $H_{(z)} > H_0$, so ist auch $\lg H_{(z)} > \lg H_0$. Der Graph sitzt also weiter unten als der H_0 -Graph (roter Bereich in Abb. 1).

Die Messdaten des SCPs manifestieren sich in einer Verschiebung nach oben, die für größer werdendes z ebenfalls etwas größer wird. Es trifft also Fall 1 zu. Daraus schließen wir, dass $H_{(z)} < H_0$. Die Hubble-Konstante $H_{(z)}$ ist umso kleiner als H_0 , je größer z ist. Anschaulich bedeutet das, dass die Expansionsgeschwindigkeit umso kleiner war, je weiter man zurückblickt. Die Expansion des Universums ist also (zumindest für $z < 1$) beschleunigt. Diese den Erwartungen einer abgebremsten Expansion widersprechenden Erkenntnis wurde von den Forschern des SCP und des High- z Supernova Search Team 1998 veröffentlicht und vom Magazin Science mit dem „Breakthrough of the Year 1998“ ausgezeichnet.

2.4 Deutung des Ergebnisses des SCP

Um diese beschleunigte Expansion nun erklären zu können, musste die kosmologische Konstante Λ wieder in die

Friedmann-Gleichung eingeführt werden; denn Λ beschreibt ja eine repulsive Kraft. Diese Abstoßung soll für die derzeitige Beschleunigung der Expansion verantwortlich sein. Unser Universum ist also sowohl mit Masse der Dichte ρ_M (hierzu gehört leuchtende + nicht leuchtende + heiße/kalte Dunkle Materie) als auch mit sogenannter Dunklen Energie der Dichte ρ_Λ gefüllt.

Messungen des WMAP-Satelliten und Resultate der Inflationstheorie kommen unabhängig vom SCP zum Schluss, dass unser Universum auf großen Skalen flach ist, also die Gesamtdichte $\rho_M + \rho_\Lambda$ (man vernachlässigt hier, wie auch im gesamten Artikel, die Strahlungsdichte) gleich der kritischen Dichte ρ_c ist. Dieses Faktum kann nun mit den Messungen des SCPs vereinbart werden, woraus Werte für ρ_M und ρ_Λ folgen. Dies ist in Abb. 2 veranschaulicht. Die x-Achse stellt

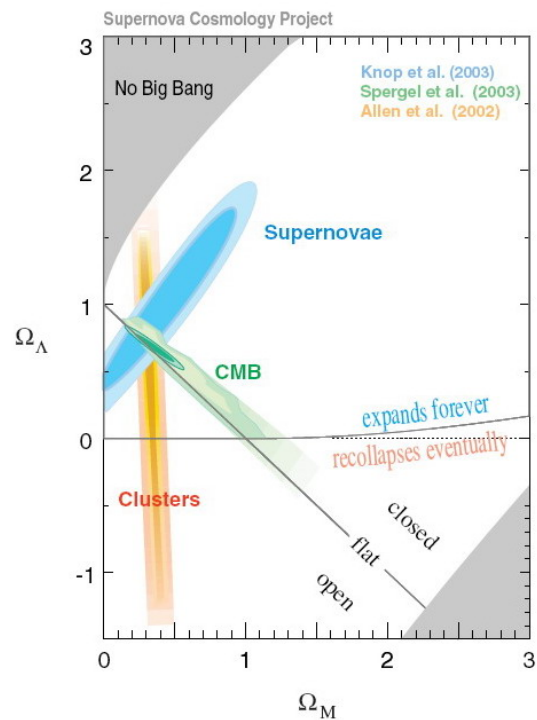


Abb. 2: Ω_M - Ω_Λ -Ebene

$\Omega_M = \rho_M/\rho_c$, die y-Achse $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_c$ dar, also jeweils die entsprechende Dichte in Einheiten der kritischen Dichte. Die in den blauen Ellipsen enthaltenen Wertepaare von Ω_M und Ω_Λ werden durch die SCP-Messungen zugelassen. Die in den grünen Bereichen enthaltenen Wertepaare entsprechen den WMAP-Messungen der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB) und die orangefarbenen Bereiche stellen Vermessungen von Galaxien-Clustern dar. Einem dunkleren Farbton entspricht jeweils eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Ω_M und Ω_Λ in diesem Bereich. Offensichtlich schneiden sich die Bereiche bei $\Omega_M \approx 0.3$ und $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ in einem Bereich, der nahezu flache Geometrie und ewige Expansion symbolisiert. Genauere Simulationen auf Basis der Friedmann-Gleichung ergeben $\Omega_M = 0.28$ und $\Omega_\Lambda = 0.72$. Der größte Anteil der Energie im Universum ist also Dunkle Energie, Materie stellt nur den kleineren Anteil dar. Außerdem kann unter der Annahme flacher Geometrie

die Geschichte der kosmischen Expansion für verschiedene Werte von Ω_M und Ω_Λ simuliert werden. Ergebnisse solcher Berechnungen sind in Abb. 3 dargestellt: Die x-Achse

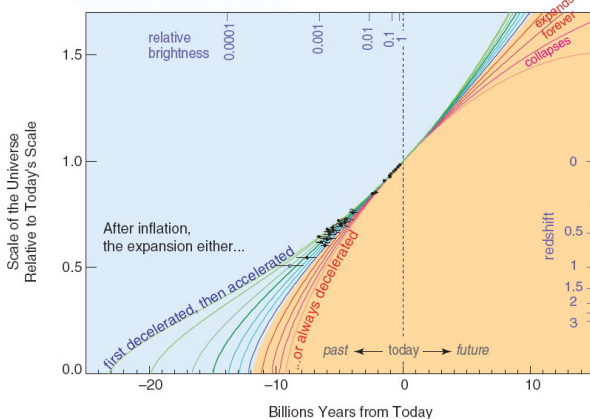


Abb. 3: Modelle der kosmischen Expansion für Parameter Ω_M und Ω_Λ

stellt die Zeit in Milliarden Jahren dar, gemessen vom heutigen Zeitpunkt aus. Auf der y-Achse ist der Skalenfaktor $R = 1/(1+z)$ aufgetragen. Jeder Graph in Abb. 3 stellt einen Verlauf der Größe des Universums im Laufe der Zeit dar. Dabei entspricht negative (positive) Krümmung des Graphen einer abgebremsten (beschleunigten) Expansion. Der orange hinterlegte Bereich steht also für Universen, die immer abgebremst expandieren, also Universen ohne Dunkle Energie d. h. $\Omega_\Lambda = 0$. Für die vier Kurven im orange hinterlegten Bereich verändert sich Ω_M von 0.8 (oberste Kurve) zu 1.4 (unterste Kurve). Für die beiden oberen (unteren) Kurven ist also $\Omega_M < 1$ ($\Omega_M > 1$), was wie oben erklärt, ewig andauernder Expansion (bzw. einer letztendlichen Kontraktion mit Kollaps) entspricht. Der blau hinterlegte Bereich enthält Universen mit endlicher kosmologischer Konstante, also $\Omega_\Lambda \neq 0$. Für $z \lesssim 1$ expandieren diese Universen abgebremst, da die Materiedichte Ω_M zu dieser frühen Zeit noch genügend groß war. Ab $z \approx 1$ d. h. $R \approx 0.5$ hat die Materiedichte aufgrund der Vergrößerung des Volumens des Universums soweit abgenommen, dass nun Ω_Λ dominiert, die Expansionsgeschwindigkeit also zunimmt. Die Graphen entsprechen Universen mit einer Dichte der Dunklen Energie, die von $\Omega_\Lambda = 0.95$ (oberste Kurve) bis $\Omega_\Lambda = 0.4$ (unterste Kurve) reicht. Je größer also die Dichte der Dunklen Energie Ω_Λ ist, desto eher findet der Übergang von abgebremster zu beschleunigter Expansion statt. Die dunkelgrüne Linie beschreibt den den Messwerten entsprechenden Verlauf der kosmischen Expansion. Offensichtlich ist unser Universum ca. 15 Milliarden Jahre alt (Schnittpunkt mit x-Achse) und expandierte in der Zeit des materiedominierten Kosmos abgebremst. Seit ca. $z \approx 1$ d. h. $R \approx 0.5$ ist die kosmische Expansion beschleunigt, man spricht von einem durch Dunkle Energie dominierten Kosmos. Als wahrscheinlichste Zukunft unseres Universums wird ein kalter, dunkler Kosmos angenommen, das Universum endet im sogenannten Big Whimper.

Anmerkung: Neuere Messungen von WMAP schätzen das Alter des Universums auf 13,7 Milliarden Jahre.

Welche physikalische Natur nun die Dunkle Energie hat, ist ungeklärt. Interpretiert man sie als kosmologische Konstante, so kann sie mit einer aus der Teilchenphysik bekannten Energiedichte des Vakuums in Verbindung gebracht werden. Diese Energiedichte wird durch zufällige Entstehung und kurz darauf folgende Vernichtung von virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paaren hervorgerufen, was aufgrund der Heisenbergschen Unschärferelation erlaubt ist. Glaubt man Berechnungen der Teilchenphysik, so beträgt die Vakuumenergiedichte $\rho_\Lambda \approx 10^{92} \text{ g cm}^{-3}$, was jedoch unvereinbar mit dem im SCP gemessenen Wert von $\rho_\Lambda = 0.72\rho_c \approx 1.3 \times 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ ist! Diesem allgemein favorisierten Modell einer zeitlich unveränderlichen Vakuumenergiedichte stehen zahlreiche spekulative Ansätze zur Deutung der Dunklen Energie gegenüber. Die Kleinheit von ρ_Λ hat beispielsweise eine Assoziation der Dunklen Energie mit einer zeitlich veränderlichen, den Raum inhomogen ausfüllenden Quintessenz motiviert. Eine Identifikation der Dunklen Energie mit einem fluktuierenden, zeitlich variablen Radion-Kraftfeld könnte den Urknall als Resultat einer Kollision eines Vorläuferuniversums mit einem Paralleluniversum erklärbar machen. Desweiteren gibt es Modelle, die die Dunkle Energie als Phantom-Energie verstehen, welche zu einer stark beschleunigten Expansion führt und das Universum in ca. 50 Milliarden Jahren im sogenannten Big Rip enden lässt, bei dem sämtliche kompakten Objekte, wie z. B. Schwarze Löcher aber auch Elementarteilchen zerrissen werden. Außerdem kann die Dunkle Energie als kompaktifizierte Extradimensionen verstanden werden. Diese könnten plötzlich de-kompaktifiziert werden, was in einer vollständigen Zerstörung unserer vierdimensionalen Welt resultieren würde.

2.5 Ausblick

Da die beschleunigte Expansion unabhängig vom SCP und vom High- z Supernova Search Team entdeckt wurde, zweifelt heute niemand mehr an dessen Richtigkeit. Trotzdem wurden weitere Forschungsprojekte auf den Weg gebracht. So zum Beispiel die seit 2002 laufende Supernova Legacy Survey (SNLS), die ein noch besseres Verständnis der SNe Ia zum Ziel hat. Haben sich SNe Ia während der gesamten kosmischen Geschichte wirklich auf gleiche Weise ereignet? Und folglich: Ist ihre absolute Helligkeit wirklich so einheitlich, wie oben angenommen? Außerdem wird immer wieder die Vermutung geäußert, dass sogenannter grauer Staub existiert. Diese Materieform könnte, auf der Sichtlinie zwischen der SN und dem Beobachter befindlich, das Licht der SN wellenlängenunabhängig absorbieren. Somit würde die SN schwächer, also ebenfalls weiter entfernt erscheinen. In der SNLS wird die Existenz solchen grauen Staubs untersucht. Das 2-Meter-Weltraum-Teleskop Supernova / Acceleration Probe (SNAP), das frühestens 2013 gestartet wird, hat zum Ziel, noch tiefer in die Vergangenheit zu schauen. Es sollen pro Jahr bis zu 2000 SNe Ia mit $1 < z < 2$ beobachtet werden. Dies würde einen Blick in den materiedominierten Kosmos erlauben, also in die Zeit zu der die Expansion noch abgebremst verlief. Zusätzlich soll die Zeitabhängigkeit der Dichte und die Zustandsgleichung der Dunklen Energie geprüft werden, um ein besseres Verständnis von deren physikalischer Natur zu ermöglichen.

Literatur

- [1] Müller: *Lexikon der Astrophysik* auf <http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/pdf>
- [2] Basu: *Dictionary of geophysics, astrophysics and astronomy*
- [3] Weigert, Wendker, Wisotzki: *Astronomie und Astrophysik*
- [4] Unsöld, Baschek: *Der neue Kosmos*
- [5] Perlmutter: *Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe*. Physics Today (April 2003)
- [6] Perlmutter: *Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe: The Status of the Cosmological Parameters*. International Journal of Modern Physics A, Volume 15, 715-739 (2000)
- [7] Filippenko: *Type Ia Supernovae and Cosmology – White Dwarfs: Probes of Galactic Structure and Cosmology* (2004)
- [8] Perlmutter: *Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe*. Astrophysical Journal (1997)
- [9] Perlmutter: *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*. Astrophysical Journal (1998)
- [10] Phillips: *The absolute magnitudes of type Ia supernovae*. Astrophysical Journal Volume 413 (1993)
- [11] <http://supernova.lbl.gov/>
- [12] <http://snap.lbl.gov/>